



The Effect of Nitrification Inhibitor on Grain Yield of Wheat Cultivars and Some Soil Properties under Conventional and No-Tillage Systems

Ghorban Khodabin ¹| Ashkan Jalilian ^{2✉}| Ehsan Zandi Esfahan ³| Nima Shahbazi ⁴
Fatemeh Amini ⁵| Shiva Ghaznavi ⁶| Ali Heidarzadeh ⁷

1. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: g.khodabin@modares.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: ashkanjalilian@ut.ac.ir
3. Research Institute of Forests and Rangelands, Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran.
4. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.
5. Department of Agronomy and Plant Breeding, Faculty of Agricultural Science, Islamic Azad University, Shahr-e-Qods Branch, Iran.
6. Department of Agricultural Economics, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Karaj, Iran.
7. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received: July 17, 2022

Received in revised form:
November 03, 2022

Accepted: November 13, 2022

Published online: April 28,
2023

Keywords:

Ammonia-oxidizing,
N₂O,
Nitrapyrin,
Nitrification,
No-tillage.

ABSTRACT

In agriculture, nitrogen fertilizer does not effectively absorb by plants. Several biological activities in the soil convert N into various compounds. Nitrogen oxide (N₂O) is an influential greenhouse gas formed in soils due to nitrification and denitrification process. Nitrapyrin (NI) combined with ammonium (NH₄⁺) based fertilizers is an effective technique for minimizing the N loss in agricultural soils by regulating ammonia-oxidizing. This research was conducted during 2019-2020 to determine the effect of NI on nitrogen emissions in soil and crop yield of wheat cultivars at three urea (UR) levels, NI+urea (NIU), and control (CO) on two cultivars (Rakhshan and Pishgam) and two tillage systems (No tillage (NT) and conventional tillage (CT)). The highest amounts of NH₄⁺, NO₃⁻ and N₂O were found at the stem elongation stage. While NIU fertilizer treatment yielded the highest NH₄⁺ (18.38 mg kg⁻¹), the UR fertilizer treatment yielded the highest NO₃⁻ (25.96 mg kg⁻¹) and N₂O (0.0192 kg N₂O-N ha⁻¹ day⁻¹). At all developmental stages in the CT and NT systems, the NIU treatment decreased the average nitrification of NH₄⁺ and its conversion to NO₃⁻ by 27.81 and 15.45%, respectively. Our findings, thus, showed that NI application in conjunction with UR could highly reduce N₂O emissions. In addition to the favorable economic impact, increasing N availability in the soil through minimizing nitrification by NI may reduce detrimental environmental consequences on water resources and greenhouse gas emissions.

Cite this article: Khodabin, G., Jalilian, A., Zandi Esfahan, E., Shahbazi, N., Amini, F., Ghaznavi, S., & Heidarzadeh, A. (2023). The effect of nitrification inhibitor on grain yield of wheat cultivars and some soil properties under conventional and no-tillage systems. *Iranian Journal of Field Crop Science*, 54(2), 31-46. DOI: 10.22059/ijfcs.2022.345822.654927.



© The Authors.

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/ijfcs.2022.345822.654927>



تأثیر بازدارنده نیتروفیکاسیون بر عملکرد رقم‌های گندم و برخی ویژگی‌های خاک در سامانه‌های خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی

قربان خدایین^۱، اشکان جلیلیان^۲✉، احسان زندی اصفهان^۳، نیما شهبازی^۴، فاطمه امینی^۵، شیوا غزنوی^۶، علی حیدرزاده^۷

۱. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، رایانامه: g.khodabin@modares.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، رایانامه: ashkanjalilian@ut.ac.ir
۳. موسسه تحقیقات جنگل‌ها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
۴. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.
۵. گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر قدس.
۶. گروه اقتصاد کشاورزی، دانشکده کشاورزی، دانشکدگان کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.
۷. گروه زراعت، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۲۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۲/۰۸

کلیدواژه‌ها:

اکسیدکننده آمونیوم، بدون خاک‌ورزی، نیتراپایرین، نیتروس اکسید، نیتروفیکاسیون

در کشاورزی کود نیتروژن به‌طور مؤثری جذب گیاه نمی‌شود و از طریق انتشار به هوا و آبشویی در خاک از دسترس گیاه خارج می‌شود. انتشار نیتروس اکسید و آبشویی نیترات در نتیجه فرایندهای نیتروفیکاسیون خاک می‌باشد و مهارکننده نیتراپایرین با اختلال در این فرایند می‌تواند باعث بهبود کارایی کاربرد نیتروژن در خاک شود. به همین منظور با هدف بررسی اثرگذاری نیتراپایرین در شرایط خاک‌ورزی متفاوت بر انتشارات خاک و عملکرد زراعی رقم‌های گندم (*Triticum aestivum*) آزمایشی به صورت کرت‌های خردشده فاکتوریل در قالب بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار و سه سطح کودی اوره، ترکیب نیتراپایرین+اوره و کنترل و دو رقم رخشان و پیشگام در دو سطح خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی در سال زراعی ۱۳۹۹-۱۳۹۸ در شهر کرج انجام شد. نتایج نشان داد بیشترین مقدار آمونیوم، نیترات و نیتروس اکسید در مرحله نموی طولی شدن ساقه حاصل شد. بیشترین آمونیوم ($18/38 \text{ mg kg}^{-1}$) در تیمار کودی نیتراپایرین+اوره و بیشترین میزان نیترات ($25/96 \text{ mg kg}^{-1}$) و نیتروس اکسید ($1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ day}^{-1}$) در تیمار کودی اوره به دست آمد. کاربرد نیتراپایرین+اوره میانگین نیتروفیکاسیون آمونیوم و تبدیل آن به نیترات را در کل مراحل نموی گندم در خاک‌ورزی مرسوم و بی خاک‌ورزی به ترتیب ۲۷/۸۱ و ۱۵/۴۵ درصد کاهش داد. یافته‌ها نشان داد کاربرد نیتراپایرین به همراه اوره از انتشار نیتروس اکسید به میزان قابل توجهی جلوگیری کرد. فراهمی بیشتر نیتروژن در خاک از طریق کاهش نیتروفیکاسیون توسط نیتراپایرین علاوه بر تأثیر مثبت اقتصادی می‌تواند از اثرات زیان‌بار زیست‌محیطی بر منابع آبی و گازهای گلخانه‌ای جلوگیری کند.

استناد: خدایین، ق، جلیلیان، ا، زندی اصفهان، ا، شهبازی، ن، امینی، ف، غزنوی، ش، و حیدرزاده، ع. (۱۴۰۲). تأثیر بازدارنده نیتروفیکاسیون بر عملکرد رقم‌های گندم و برخی ویژگی‌های خاک در سامانه‌های خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی. *علوم گیاهان زراعی ایران*، ۵۴(۲): ۳۱-۴۶.

DOI: 10.22059/ijfcs.2022.345822.654927



۱. مقدمه

تولیدات بخش کشاورزی و استفاده از کودهای نیتروژن دار در قرن گذشته افزایش چشمگیری داشته است و پیش‌بینی می‌شود با افزایش جمعیت تا سال ۲۰۵۰ تقاضا برای افزایش تولید و کاربرد نیتروژن ادامه داشته باشد (Woodward *et al.*, 2021). نیتروژن موجود در کودها، به‌صورت موثری مورد استفاده قرار نمی‌گیرد و در خاک، توسط فرآیندهای زیستی به فرم‌های گوناگونی تبدیل می‌شود؛ علاوه‌براین می‌تواند به‌صورت نیترات با آبشویی از دسترس گیاه خارج و سبب بروز آلودگی آب‌های زیرزمینی شود (Corrochano-Monsalve *et al.*, 2020). نیتروفیکاسیون به‌عنوان فرایند تبدیل آمونیوم به نیترات در کشاورزی بسیار مهم می‌باشد که در آن نیتروس اکسید نیز به‌عنوان یک محصول جانبی توسط اکسیدکننده‌های آمونیاک AOA و یا AOB تولید می‌شود (Cui *et al.*, 2013). افزایش کاربرد کود لزوماً با افزایش عملکرد گیاه همراه نخواهد شد و میزان از دست‌دادن نیتروژن پیش از جذب آن توسط گیاه نیز افزایش می‌یابد، ازاین‌رو جهت افزایش کارایی کاربرد نیتروژن، کاربرد مهارکننده‌های نیتروفیکاسیون، مانند نیتراپایرین در خاک توصیه شده است (Woodward *et al.*, 2021). نیتراپایرین آنزیمی میکروبی است که نخستین مرحله نیتروفیکاسیون از آمونیوم به نیتريت را کاتالیز می‌کند و از فعالیت آمونیاک مونواکسیژناز در خاک و آب جلوگیری می‌کند (Woodward *et al.*, 2021).

نیتراپایرین ترکیبی آلی کلره می‌باشد که با آمونیوم کودهای نیتروژنه می‌تواند کلاته بشود تا گیاه بتواند به‌مدت طولانی از آن استفاده کند و همچنین سبب کاهش انتشار نیتروس اکسید در خاک‌های زراعی شود (Bhandari *et al.*, 2020; Dawar *et al.*, 2021). نوع خاک می‌تواند فراوانی و ترکیب باکتری‌های اکسیدکننده آمونیاک را کنترل کند (Chen *et al.*, 2010). AOB و AOA در اکثر خاک‌های کشاورزی همزیستی دارند، ولی به نظر می‌رسد جمعیت AOB در خاک‌های با نیتروژن بالا، زیاد می‌شود (Duan *et al.*, 2017). روش‌های گوناگون خاک‌ورزی می‌تواند بر فعالیت نیتراپایرین و تأثیر آن بر کاهش انتشار نیتروس اکسید اثرگذار باشد (Corrochano-Monsalve *et al.*, 2020). خاک‌ورزی در صورتی که به درستی اعمال نشود، باعث انتشار و هدرروی نیتروژن چه به‌صورت گازی و چه به صورت آبشویی می‌شود (Keshavarz Afshar *et al.*, 2018). استفاده از سامانه‌های خاک‌ورزی حفاظتی مانند خاک‌ورزی حداقل یا بدون خاک‌ورزی به‌دلیل تأثیر مفید آن در ذخیره آب خاک، به‌عنوان یکی از امیدوارکننده‌ترین راهکارها برای افزایش ذخایر کربن آلی خاک در مناطق خشک بیان شده است (Plaza-Bonilla *et al.*, 2014). مطالعه‌های دیگر نشان داده است که تنوع باکتریایی خاک، فراوانی نسبی و عملکرد آن‌ها در سامانه‌های خاک‌ورزی گوناگون، به‌دلیل ارتباط آن با ویژگی‌های فیزیکی خاک متفاوت است (Carbonetto *et al.*, 2014; Souza *et al.*, 2013; Thompson *et al.*, 2016; Xia *et al.*, 2019).

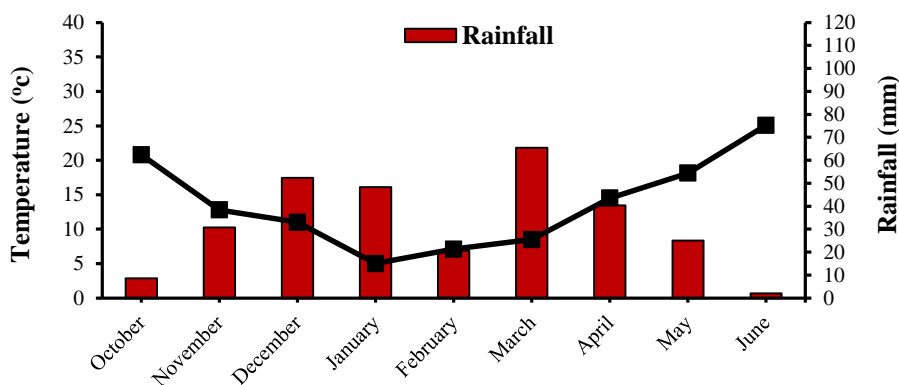
خاک‌ورزی و همچنین شیوه‌های مدیریت حاصلخیزی خاک می‌تواند بر فرایندهای فیزیکوشیمیایی و زیستی خاک تأثیرگذار باشد و در نتیجه آن پایداری سامانه‌ها را تغییر دهد (Khodabin *et al.*, 2022; Moghadam *et al.*, 2022). خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند منجر به تخریب خاک و اثرات منفی بر ویژگی‌های شیمیایی و زیستی آن شود، درحالی‌که عملیات بدون خاک‌ورزی ساختار و پایداری خاک را تقویت می‌کند (Nunes *et al.*, 2020). بررسی‌ها نشان داد خاک‌ورزی بر میزان آمونیوم، نیترات و نیتروس اکسید در کشت ذرت اثر معنی‌داری ندارد، درحالی‌که نیتراپایرین منجر به کاهش نیترات خاک شد (Borzouei *et al.*, 2021). همچنین نیتراپایرین میزان نیترات خاک را ۶۵ درصد کاهش داد (Li *et al.*, 2021). بررسی‌ها نشان می‌دهد میزان انتشار نیتروس اکسید در بدون خاک‌ورزی ۳۰ تا ۲۰۰ درصد بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم گزارش شده است (Grave *et al.*, 2018). کاربرد نیتراپایرین عملکرد دانه گندم، کارایی استفاده از نیتروژن و کارایی مصرف نیتروژن را افزایش

1. Ammonia-oxidizing archaea
2. Ammonia-oxidizing bacteria

داد (Bhandari et al., 2020). همچنین کاربرد نیتراپایرین باعث بهبود افزایش سطح برگ، زیست توده و جذب دی اکسید کربن می شود (Ren et al., 2020). کاربرد نیتراپایرین به همراه اوره نسبت به کاربرد خالص اوره نرخ خالص فتوسنتز و وزن خشک گیاه را افزایش می دهد (Cai et al., 2018). غلات و گندم سهم مهمی در برنامه ریزی های غذایی انسان دارند، به نحوی که بیش از ۷۰ درصد سطح زیر کشت گیاهان زراعی را غلات به خود اختصاص است و ۵۰ درصد از پروتئین انسان را نیز تأمین می کنند. سرانه مصرفی گندم در ایران ۲۳۲ کیلوگرم در سال است که نسبت به میانگین جهانی بیش از دو برابر می باشد (Jalilian et al., 2018). از این رو بررسی اثرات مهارکننده نیتریفیکاسیون در شرایط متفاوت خاک ورزی بر عملکرد گندم و ویژگی های خاک می تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد. بر این اساس این مطالعه با هدف ارزیابی اثر خاک ورزی، کود اوره همراه با نیتراپایرین و رقم های گندم بر ویژگی های خاک و عملکرد دانه و انتشار نیتروس اکسید اجرا شد.

۲. روش شناسی پژوهش

این آزمایش در فصل زارعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹ در ایستگاه تحقیقاتی پژوهشکده جنگل ها و مراتع استان البرز، شهرستان کرج (طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۹۸ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۷۶ دقیقه شمالی) انجام شد. میانگین بلندمدت بارندگی البرز ۲۳۱ میلی متر و بیشترین بارندگی در ماه آذر و کمترین نیز در ماه های مرداد و شهریور می باشد (شکل ۱).



شکل ۱. تغییرات دما و بارندگی در ایستگاه هواشناسی کرج در فصل زارعی ۱۳۹۸-۱۳۹۹

ویژگی های خاک مزرعه تحقیقاتی نیز پس از نمونه برداری اندازه گیری و در جدول ۱ آمده است. طرح آزمایشی به صورت کرت های خرد شده فاکتوریل در قالب بلوک های کامل تصادفی در سه تکرار بود. کرت اصلی شامل دو سطح خاک ورزی [بدون خاک ورزی (NT) و خاک ورزی مرسوم (CT)]، کرت فرعی سه سطح کودی [کنترل (بدون کوددهی)، ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره و ۳۵۰ کیلوگرم در هکتار اوره+۵۱/۰ کیلوگرم در هکتار نیتراپایرین] و رقم های گندم (رخشان و پیشگام) بود. اعمال تیمارهای کودی در دو زمان انجام شد، یک سوم آن در مرحله کشت و دو سوم آن در مرحله ساقه دهی به خاک اضافه شد. تیمار نیتراپایرین نیز همزمان با تقسیم کود اوره به صورت محلول پاشی به خاک اضافه شد (Chen et al., 1994). تاریخ کشت گندم در اوایل آبان ماه بود. هر کرت آزمایش شامل شش ردیف گندم به طول پنج متر بود. میزان بذر کشت شده در این تحقیق ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار بود. تمامی مراحل کشت، داشت و برداشت گندم یکسان و باتوجه به عرف منطقه می باشد که در جدول ۲ قابل مشاهده است.

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک محل اجرای آزمایش

	Conventional tillage	No- tillage
pH	7.1	6.3
EC (dS m ⁻¹)	1.91	1.87
Organic Carbon (%)	0.58	0.73
N (%)	0.06	0.08
P (mg/kg)	13	11
K (mg/kg)	284	258
Fe (mg/kg)	4.71	5.04
Zn (mg/kg)	1.7	1.5
Mn (mg/kg)	5.8	6.01
No ₃ ⁻ (mg/kg)	20.4	19.8
NH ₄ ⁺ (mg/kg)	7.8	12.9
Clay (%)	43	43
Silt (%)	37	37
Sand (%)	20	20
Bulk density (g cm ³)	1.16	1.22

نمونه برداری صفات گندم بعد از رسیدگی فیزیولوژیک انجام گرفت، به نحوی که با رعایت خطوط حاشیه، دو متر مربع از هر کرت آزمایشی برای عملکرد در نظر گرفته شد. میزان انتشار نیتروس اکسید با استفاده از محفظه‌های بسته استاتیک که در بازه زمانی ۹ تا ۱۰ صبح و در فواصل زمانی صفر، ۱۰ و ۲۰ دقیقه (گاز از طریق سرنگ‌های مخصوص ۲۰ میلی‌لیتری از محفظه‌ها جمع‌آوری شد) از کشت تا برداشت اندازه‌گیری شد (Zhou *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015). غلظت گاز با استفاده از سامانه کروماتوگرافی گازی (Agilent 7890 A, USA) و شیوه‌نامه فنی آن (اندازه‌گیری در صبح، کروماتوگرافی با یک ستون فولادی ضد زنگ ۴ میلی‌متری با طول ۳ متر و به همراه گاز حامل N₂ و ستون و آشکارساز به ترتیب در دمای ۷۰ و ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد) اندازه‌گیری شد (Liu *et al.*, 2015).

ویژگی‌های آمونیوم و نترات خاک در آزمایشگاه خاک‌شناسی اندازه‌گیری شد (Cui *et al.*, 2013). نمونه برداری‌ها براساس مراحل رشدی گندم شامل پنجه‌زنی، طویل شدن ساقه، آبستنی، گلدهی و رسیدگی کامل انجام گرفت. محتوای آب منافذ خاک (WFPS) نیز با روش (Linn & Doran, 1984) اندازه‌گیری شد. هزینه‌های اجتماعی ایجاد شده ناشی از انتشار یا کاهش یک تنی نیتروس اکسید در بعد زمانی و مکانی خاص نیز اندازه‌گیری شد (Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2019). هنگامی که انتشار گازهای گلخانه‌ای به حداقل می‌رسد، هرچقدر مقدار هزینه اجتماعی نیتروژن بالاتر باشد، می‌تواند از خسارت به محیط زیست جلوگیری کند (Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2019). زمانی که همه متغیرها ثابت بمانند، صرف هزینه بیشتر برای محدود کردن چنین انتشاراتی مطلوب می‌باشد (Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2019). ضریب استاندارد برای محاسبه هزینه‌های اجتماعی تولید نیتروس اکسید معادل ۴/۵۸ دلار به ازای هر کیلوگرم می‌باشد (Nabavi-Pelesaraei *et al.*, 2019).

داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار SAS 9.4 مورد تجزیه و تحلیل آماری قرار گرفت. برای تعیین توزیع نرمال و همگنی داده‌ها پیش از انجام تحلیل واریانس (ANOVA) از آزمون Shapiro-Wilk استفاده شد که نتایج نشان از نرمال بودن داده‌ها بود. بلوک‌ها (تکرارها)، خاک‌ورزی و تیمار کود اثرات ثابت در نظر گرفته شدند. تفاوت در میانگین صفات اندازه‌گیری شده با استفاده از جدول واریانس ANOVA در سطح احتمال ۵ درصد تعیین شد. از آزمون کمترین تفاوت معنی‌دار (LSD) برای مقایسه میانگین‌ها استفاده شد. از نرم‌افزار اکسل نیز برای رسم شکل‌ها استفاده شده است.

جدول ۲. عملیات خاکورزی و مدیریت کشت، داشت و برداشت در طول آزمایش

Agronomic practices	No- tillage	Conventional tillage
Planting		
Plowing Machine	×	*
a. Chisel plough	×	×
b. Moldboard Plows	×	working depth= 25 cm
c. Disc Harrows	×	working depth = 15 cm × 2
Fertilization	*	*
a. Urea	F2 (1/3 (116 kg ha ⁻¹)) F3 (1/3+ Nitrapyrin)	F2 (1/3 (116 kg ha ⁻¹)) F3 (1/3 + Nitrapyrin)
b. Nitrapyrin	1/3 (0.17 kg ha ⁻¹) Nitrapyrin Foliar application in soil	1/3 (0.17 kg ha ⁻¹) Nitrapyrin Foliar application in soil
c. Phosphorus	130 kg ha ⁻¹	130 kg ha ⁻¹
Sowing	Disc drill	Disc drill
Growing		
Fertilization	*	*
a. Urea	F2 (2/3 (233 kg ha ⁻¹)) F3 (2/3 + Nitrapyrin)	F2 (2/3 (233 kg ha ⁻¹)) F3 (2/3 + Nitrapyrin)
b. Nitrapyrin	2/3 (0.34 kg ha ⁻¹) Nitrapyrin Foliar application in soil	2/3 (0.34 kg ha ⁻¹) Nitrapyrin Foliar application in soil
Irrigation	Furrow irrigation	Furrow irrigation
Weed management	Hand weeding	Hand weeding
Pest management	Matasystox-R 25% EC (1-1.5 L/1000 L ha ⁻¹)	Matasystox-R 25% EC (1-1.5 L/1000 L ha ⁻¹)
Harvesting	Manual sampling (2 m ²)	Manual sampling (2 m ²)

* نشان دهنده انجام عملیات و × نشان دهنده عدم انجام عملیات است.

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

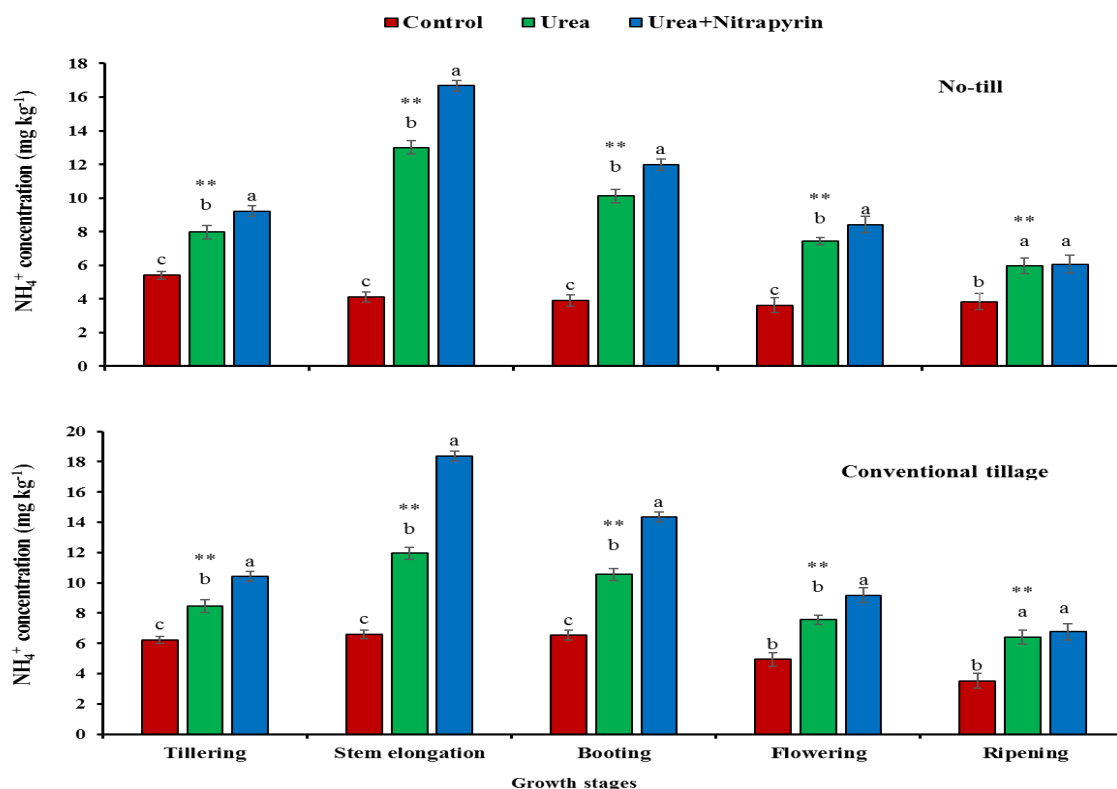
۳-۱. تجزیه واریانس

در این آزمایش تیمار خاک‌ورزی بر صفات میزان آمونیوم و نیتروس اکسید در مراحل مختلف رشدی معنی‌دار بود. اثر رقم بر هیچ کدام از صفات اندازه‌گیری شده بجز عملکرد دانه معنی‌دار نبود (جدول ۳ و ۴). تیمار کودی نیز بر کلیه صفات در همه مراحل رشدی بجز میزان نیتروس اکسید در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک اثر معنی‌داری داشت (جدول ۴). برهمکنش خاک‌ورزی در سطوح کودی نیز بر صفات عملکرد دانه، هزینه اجتماعی نیتروس اکسید، میزان آمونیوم و نیتروس اکسید در مراحل رشدی معنی‌دار بود. برهمکنش تیمارهای خاک ورزی×رقم، رقم×سطوح کودی و خاک‌ورزی×رقم×سطوح کودی نیز تنها در صفت عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۳ و ۴).

۳-۲. آمونیوم (NH₄⁺)

میزان یون آمونیوم در مراحل نمو رشد گندم در سامانه خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بدون خاک‌ورزی بالاتر بود، به نحوی که میانگین آمونیوم در کل دوره رشد گندم در خاک‌ورزی مرسوم ۸/۷۹ و در بدون خاک‌ورزی ۷/۸۵ بود (شکل ۲). روند میزان آمونیوم در هر دو سطح خاک‌ورزی تقریباً مشابه بود، به طوری که بیشترین میزان آمونیوم در مرحله طویل شدن ساقه و کمترین آن نیز در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک وجود داشت (شکل ۲). در طول دوره نمو گندم، تیمار کودی اوره+نیتراپایرین در کلیه مراحل نسبت به اوره و کنترل میزان آمونیوم بالاتری داشت، این نسبت افزایش در بدون خاک‌ورزی و مراحل نمو پنجه‌زنی، طویل شدن ساقه، آبستنی و گل‌دهی به ترتیب ۱۵/۶۶، ۲۸/۲۰، ۱۸/۳۷، ۱۳/۳۲ و ۱/۶۷ درصد بود، همچنین در شرایط خاک‌ورزی

مرسوم این نسبت به ترتیب ۲۲/۹۰، ۵۳/۸۰، ۳۵/۷۹، ۲۱/۲۹ و ۵/۲۹ درصد می‌باشد که نشان از تفاوت در دو سامانه خاک‌ورزی دارد (شکل ۲). تاثیرگذاری اوره+نیتراپایرین بر میزان آمونیوم نسبت به اوره در سامانه بدون خاک‌ورزی و مرحله طولی شدن ساقه نسبت به سامانه خاک‌ورزی مرسوم ۲۵/۵۹ درصد بالاتر بود و به‌طور کلی میانگین اثرگذاری اوره+نیتراپایرین در کل دوره نموی گندم در سامانه بدون خاک‌ورزی ۱۵/۴۵ درصد و در سامانه خاک‌ورزی مرسوم ۲۷/۸۱ درصد می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲. میزان یون آمونیوم تیمارهای کودی در سطوح گوناگون خاک‌ورزی در مراحل رشدی گندم. تفاوت‌های معنی‌دار ($P < 0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار ($n=3$) می‌باشد.

فعالیت نیتراپایرین در خاک با گذشت زمان روند کاهشی دارد (عموما چهار هفته) که در دیگر مطالعات نیز به آن اشاره شده است (Cui *et al.*, 2013; O'Callaghan *et al.*, 2010)، بنابراین زمان کاربرد آن بر میزان فعالیت باکتری‌های اکسید-کننده مؤثر است.

در این پژوهش با توجه به تقسیط کاربرد کود، در دو مرحله ابتدای رشد و مرحله ساقه‌دهی گندم (جدول ۲) میزان اثرگذاری نیتراپایرین نیز متفاوت بود. به نظر می‌رسد روند کاهشی اثرگذاری نیتراپایرین طی مراحل نموی به دلیل کاهش اثرگذاری در خاک باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد غلظت آمونیوم در خاک بعد از کوددهی به اوج خود می‌رسد، اما پس از مدتی به سرعت مصرف شده و پس از آن آمونیوم از طریق کانی‌سازی نیتروژن در خاک تأمین می‌شود (Ouyang *et al.*, 2017). به همین دلیل بالاترین میزان آمونیوم ($18/38 \text{ mg kg}^{-1}$) در مرحله طولی شدن ساقه که همزمان با تقسیط کود اوره

جدول ۳. تجزیه واریانس آزمایش صفات نیترات و آمونیوم تحت تاثیر تیمارهای خاکورزی، رقم و سطوح کودی

S.O.V	df	NO ₃					NH ₄				
		Tillering	Stem elongation	Booting	Flowering	Rippening	Tillering	Stem elongation	Booting	Flowering	Rippening
Block (R)	2	5.81 ^{ns}	3.09 ^{ns}	11.33 ^{ns}	5.87 ^{ns}	10.14*	0.35 ^{ns}	6.02*	1.84 ^{ns}	4.82 ^{ns}	3.27**
Tillage (T)	1	18.3 ^{ns}	20.77 ^{ns}	17.80 ^{ns}	10.06 ^{ns}	6.17 ^{ns}	10.55*	7.11*	9.03**	10.72*	3.88*
Main error	2	11.84	9.32	15.78	5.22	4.04	0.33	1.21	0.48	2.19	0.39
Cultivar (C)	1	13.25 ^{ns}	8.62 ^{ns}	9.41 ^{ns}	3.01 ^{ns}	2.42 ^{ns}	2.74 ^{ns}	4.07 ^{ns}	0.77 ^{ns}	1.37 ^{ns}	1.02 ^{ns}
T*C	1	8.14 ^{ns}	2.91 ^{ns}	11.19 ^{ns}	13.88 ^{ns}	1.73 ^{ns}	5.19 ^{ns}	2.84 ^{ns}	5.14 ^{ns}	7.12 ^{ns}	2.45 ^{ns}
Fertilizer (F)	2	27.09**	35.8**	46.56**	20.27**	16.58**	19.78**	30.05**	15.33**	24.43**	8.51**
T*F	2	2.91 ^{ns}	12.01 ^{ns}	15.03 ^{ns}	7.83 ^{ns}	6.14 ^{ns}	8.26*	13.88**	8.59*	9.79*	2.01*
F*C	2	15.72 ^{ns}	7.11 ^{ns}	2.71 ^{ns}	1.49 ^{ns}	7.72 ^{ns}	3.91 ^{ns}	6.11 ^{ns}	4.41 ^{ns}	1.02 ^{ns}	1.19 ^{ns}
T*C*F	2	2.66 ^{ns}	9.75 ^{ns}	5.31 ^{ns}	9.09 ^{ns}	3.11 ^{ns}	8.38 ^{ns}	1.15 ^{ns}	2.25 ^{ns}	10.75 ^{ns}	0.93 ^{ns}
Error	20	1.71	8.95	14.11	9.69	5.19	0.43	0.66	0.6	0.21	0.09
CV (%)		11.11	9.55	14.37	7.77	5.23	7.44	10.75	5.96	8.90	3.23

^{ns} غیر معنی دار، * و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشند.

جدول ۴. تجزیه واریانس آزمایش صفات نیتروس اکسید، عملکرد دانه و هزینه اجتماعی انتشار نیتروس اکسید تحت تاثیر تیمارهای خاکورزی، رقم و سطوح کودی

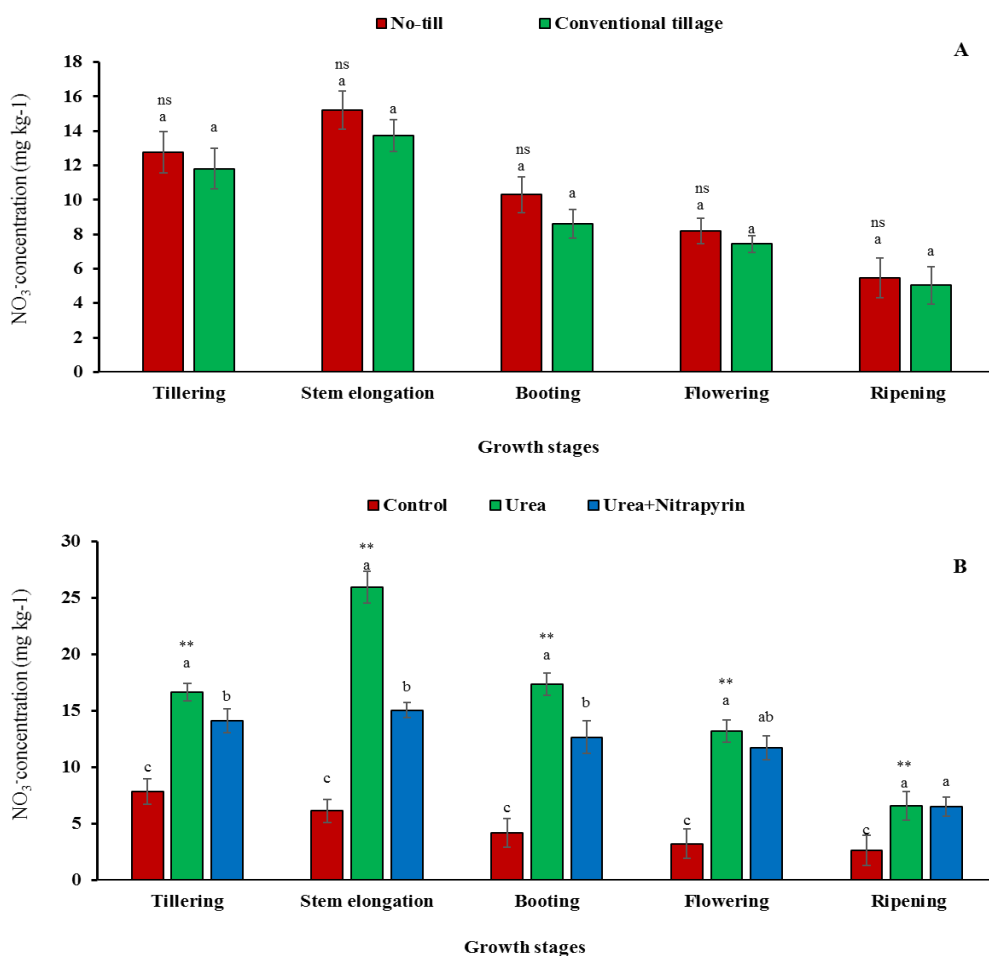
S.O.V	df	N ₂ O					Grain yield	Social cost N ₂ O emission
		Tillering	Stem elongation	Booting	Flowering	Rippening		
Block (R)	2	0.0001 ^{ns}	0.0009*	0.0007 ^{ns}	0.00003 ^{ns}	0.00017 ^{ns}	965984 ^{ns}	1.24 ^{ns}
Tillage (T)	1	0.0022**	0.025**	0.049**	0.0002*	0.0031*	7948037**	11.11**
Main error	2	0.0008	0.0011	0.014	0.0005	0.0047	3979030	0.93
Cultivar (C)	1	0.0003 ^{ns}	0.0001 ^{ns}	0.0064 ^{ns}	0.00008 ^{ns}	0.00008 ^{ns}	19871460**	0.85 ^{ns}
T*C	1	0.0005 ^{ns}	0.00007 ^{ns}	0.0004 ^{ns}	0.000073 ^{ns}	0.00025 ^{ns}	4662462*	3.27 ^{ns}
Fertilizer (F)	2	0.0151**	0.0321**	0.0979**	0.0037**	0.00036 ^{ns}	83372169**	15.78**
T*F	2	0.0093**	0.019**	0.0547**	0.00019*	0.0094 ^{ns}	4124217*	8.39*
F*C	2	0.0007 ^{ns}	0.0005 ^{ns}	0.0092 ^{ns}	0.000025 ^{ns}	0.0009 ^{ns}	3739039*	5.14 ^{ns}
T*C*F	2	0.00009 ^{ns}	0.00002 ^{ns}	0.00035 ^{ns}	0.00001 ^{ns}	0.0007 ^{ns}	5296068**	2.68 ^{ns}
Error	20	0.07	0.004	0.0219	0.00029	0.0003	923915	0.71
CV (%)		8.42	11.81	16.37	4.04	9.19	10.12	12.75

^{ns} غیر معنی دار، * و ** به ترتیب معنی دار در سطح احتمال پنج و یک درصد می باشند.

بود مشاهده شد. نیتراپایرین با مهار فرایند نیتریفیکاسیون باعث افزایش میزان آمونیوم قابل دسترس در محیط خاک می‌شود و این امر می‌تواند باعث افزایش میزان pH در خاک شود (O'Callaghan *et al.*, 2010). بررسی‌ها نشان می‌دهد ماندگاری و فعالیت نیتراپایرین در خاک به دما، فعالیت میکروبی خاک و رطوبت آن حساس می‌باشد و خاک‌ورزی با تأثیر بر میزان PH می‌تواند بر فعالیت نیتراپایرین مؤثر باشد (Ramotowski & Shi, 2022).

۳-۳. میزان نیترات (NO_3^-)

بررسی میزان نیترات در سامانه خاک‌ورزی نشان داد بالاترین میزان در هر دو سطح خاک‌ورزی در مراحل نمو ابتدای رشد (طویل شدن ساقه) بود و با طی شدن مراحل نمو میزان آن روند کاهشی داشت، باین‌حال میزان نیترات در کلیه مراحل نمو نسبت به یکدیگر تفاوت معنی‌داری را نشان نداد (شکل ۳).



شکل ۳. میزان نیترات در سطوح مختلف خاک‌ورزی (A) و تیمارهای کودی (B) در مراحل رشدی گندم. تفاوت‌های معنی‌دار ($P < 0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار ($n=3$) می‌باشد.

بالاترین میزان نیترات (۲۵/۹۶ میلی گرم در کیلوگرم خاک) در سطح کودی اوره و مرحله طویل شدن ساقه بود، این سطح نسبت به اوره+نیتراپایرین ۴۲/۹۷ درصد و نسبت به شاهد ۷۶/۴۰ درصد نیترات بیشتری داشت (شکل ۳). با طی شدن مراحل نمو گندم، میزان نیترات نیز روند کاهشی داشت، به طوری که میزان نیترات در تیمار اوره نسبت به اوره+نیتراپایرین در مراحل نمو پنجه‌زنی، طویل شدن ساقه، آبستنی و گلدهی به ترتیب ۱۵/۳۰، ۴۲/۰۳، ۲۷/۰۸ و ۱۱/۲۵ درصد بود، این میزان در مرحله رسیدگی فیزیولوژیک صرفاً ۱/۹۶ درصد بود، ولی معنی‌دار نبود (شکل ۳). کمترین میزان نیترات نیز در کلیه مراحل نمو گندم، در سطح

شاهد بود، هرچند روند آن مشابه دیگر تیمارها می‌باشد (شکل ۳). نتایج دیگر نشان داد سطح خاک‌ورزی بر میزان آمونیم نیترات و انتشار نیتروس اکسید در شرایط کشت ذرت اثر معنی‌داری ندارد، درحالی‌که نیتراپایرین اثر معنی‌داری داشت و باعث کاهش میزان نیترات در خاک شد (Borzouei et al., 2021). مطالعه دیگری نشان داد در شرایط کاربرد نیتراپایرین مقدار نیترات از ۹۵/۵۹ به ۳۳/۴۹ میلی‌گرم در کیلوگرم کاهش یافت (Li et al., 2021). در این بررسی نیز کاربرد نیتراپایرین در مرحله پنجه‌زنی میزان نیترات را ۱۶/۶۴ به ۱۴/۱ (mg kg⁻¹) کاهش داد (شکل ۳) که این روند در دیگر مراحل نمو گندم نیز وجود نداشت. به نظر می‌رسد نیتراپایرین با تأثیر بر باکتری‌های اکسیدکننده آمونیم باعث کاهش فعالیت نیتریفیکاسیون شده است. همچنین کاهش تفاوت میان سطوح کودی در اواخر دوره رشد می‌تواند به دلیل دوره فعالیت نیتراپایرین باشد (O'Callaghan et al., 2010). به‌طور کلی می‌توان گفت غلظت نیترات خاک کمتر از آمونیم بود و تحت تأثیر تیمار اوره+نیتراپایرین قرار گرفت. این امر نشان‌دهنده تأثیر نیتراپایرین بر فرایند نیتریفیکاسیون می‌باشد و که منجر به افزایش مدت زمان محتوی آمونیم در خاک می‌شود. از این رو می‌تواند در کاهش انتشار نیتروس اکسید و آبشویی نیترات مؤثر باشد (Dawar et al., 2021).

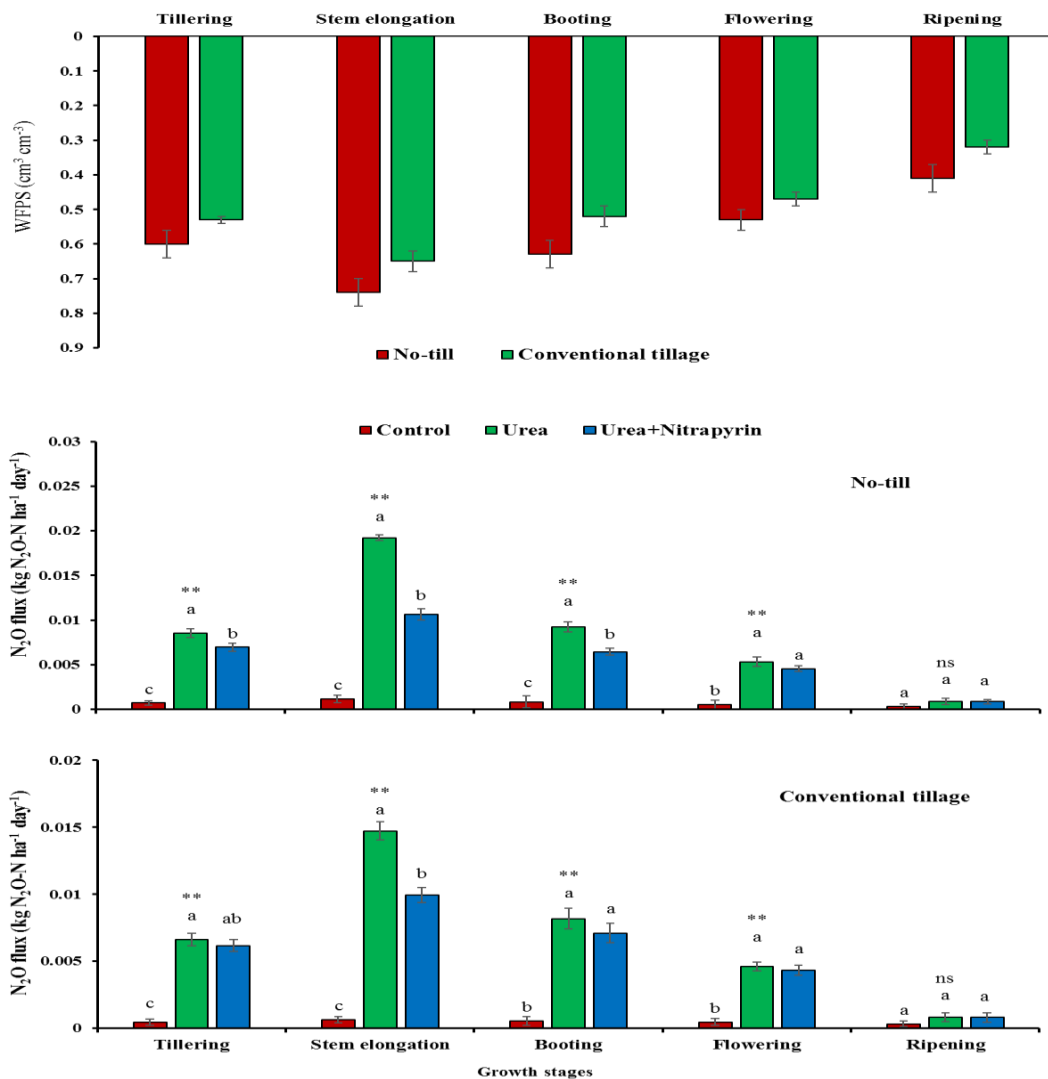
۳-۴. نیتروس اکسید (N₂O)

تأثیر خاک‌ورزی بر میزان اثرگذاری نیتراپایرین معنی‌دار بود، به‌طوری‌که در شرایط بدون خاک‌ورزی میزان انتشار نیتروس اکسید بالاتر بود. همچنین میانگین کاهش نیتروس اکسید در تیمار اوره+نیتراپایرین نسبت به اوره در کل دوره نمو گندم ۲۲/۳۲ درصد و در خاک‌ورزی مرسوم ۱۲/۰۶ درصد بود. این امر نشان می‌دهد عواملی که تحت تأثیر خاک‌ورزی در طولانی‌مدت باعث تغییر خصوصیات خاک از جمله pH و FWPS ایجاد شده است، بر میزان فعالیت نیتراپایرین نیز مؤثر بوده است. در مرحله طولیل شدن ساقه تیمار کودی اوره در سامانه خاک‌ورزی مرسوم و بدون خاک‌ورزی به ترتیب با میزان غلظت نیتروس اکسید ۰/۰۱۹۲ و ۰/۰۱۴۷ (kg N₂O-N ha⁻¹ day⁻¹) بیشترین میزان و تیمار کنترل در شرایط خاک‌ورزی مرسوم (۰/۰۰۰۳) کمترین میزان انتشار نیتروس اکسید را داشتند (شکل ۴). نتایج نشان داد که میزان انتشار نیتروس اکسید در سامانه بدون خاک‌ورزی در شرایط کاربرد نیتراپایرین در مراحل نمو پنجه‌زنی، طولیل شدن ساقه، آبستنی و گلدهی به ترتیب ۱۸/۳۱، ۴۴/۵۰، ۳۰/۱۰، ۱۴/۸۶ و ۳/۸۱ درصد کاهش یافت، این میزان در سامانه خاک‌ورزی مرسوم به ترتیب ۶/۸۹، ۳۲/۵۱، ۱۳/۰۴، ۶/۱۵ و ۱/۷۳ درصد بود (شکل ۴).

در این مطالعه میانگین میزان انتشار نیتروس اکسید در کل دوره رشد گندم در سامانه بدون خاک‌ورزی ۱ kg N₂O-N ha⁻¹ day⁻¹ بود که نسبت به خاک‌ورزی مرسوم (۰/۰۰۴۳۷) ۱۳/۹۲ درصد انتشار بیشتری داشت (شکل ۴). همزمانی تقسیط کودی در مرحله طولیل شدن ساقه و WFPS بالاتر در این مرحله یکی از دلایل اصلی انتشار بالاتر نیتروس اکسید در سامانه بدون خاک‌ورزی و مرحله طولیل شدن ساقه می‌باشد. نتایج دیگر مطالعات نشان داد میزان انتشار نیتروس اکسید در شرایط بدون خاک‌ورزی و WFPS بالا، ۳۰ تا ۲۰۰ درصد بیشتر از خاک‌ورزی مرسوم بود (Grave et al., 2018). اثرگذاری نیتراپایرین در مرحله طولیل شدن ساقه بالاترین بود که علت آن می‌تواند به دلیل همزمانی تقسیط کاربرد کود اوره و کاربرد نیتراپایرین در این مرحله نمو باشد و کاهش میزان اثرگذاری نیتراپایرین در اواخر دوره رشد نیز می‌تواند به دلیل کاهش اثرگذاری نیتراپایرین به دلیل نیمه‌عمر فعالیت آن، جذب و تجزیه آن در خاک باشد که بر انتشار نیتروس اکسید بسیار مؤثر است (Wolt, 2000). چرا که تجزیه یا جذب بالای نیتراپایرین در اغلب خاک‌های کشاورزی بین ۵ تا ۴۲ روز گزارش شده است (Cui et al., 2013). همچنین باتوجه به حضور گندم و جذب نیتروژن در خاک، در اواخر دوره رشد به‌طور کلی میزان نیتروژن کاهش می‌یابد (Lognoul et al., 2017).

بررسی‌ها نشان می‌دهد حداکثر میزان انتشار نیتروس اکسید در گیاه گندم بعد از کوددهی به‌صورت پایه و سرک می‌باشد (Bhandari et al., 2020)، در این مطالعه نیز این روند مشاهده شد. بررسی‌های دیگر نیز نشان می‌دهد نیتراپایرین با کاهش نرخ نیتریفیکاسیون از طریق مهار فعالیت آمونیاک مونواکسیژناز باعث کاهش میزان انتشار نیتروس اکسید می‌شود (Barrena et al., 2017; Pokharel & Chang, 2021).

کاهش میزان نیتروس اکسید در شرایط کاربرد نیتراپایرین می‌تواند یکی از راهکارهای مناسب در جهت کاهش آثار زیان‌بار زیست‌محیطی نیتروس اکسید باشد. نتایج مطالعات نشان می‌دهد کاربرد نیتراپایرین به‌صورت قابل توجهی میزان انتشار جمعی نیتروس اکسید را در خاک‌ورزی معمولی و حداقل خاک‌ورزی به ترتیب ۴۱ و ۳۲ درصد کاهش می‌دهد (Borzouei et al., 2021).



شکل ۴. میزان نیتروس اکسید در سطوح مختلف خاک‌ورزی و تیمارهای کودی در مراحل رشدی گندم. محتوی آب منافذ خاک در مراحل رشدی گندم در سامانه‌های خاک‌ورزی. تفاوت‌های معنی‌دار ($P < 0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار ($n=3$) می‌باشد.

میزان انتشار نیتروس اکسید در سامانه‌های خاک‌ورزی متفاوت است، چرا که ساختار خاک به دلیل حفظ بقایا، دست‌خوردگی کم‌تر و همچنین بهبود خصوصیات کیفی خاک می‌تواند از ویژگی‌های مؤثر بر انتشار نیتروس اکسید به شمار آید. به‌طور کلی دیگر نتایج نیز نشان می‌دهد انتشار نیتروس اکسید از سطح بدون خاک‌ورزی، میزان نیتروژن بالاتر و WFPS بالا در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود (Marquina *et al.*, 2015). مطالعات دیگری نیز وجود دارد که افزایش میزان انتشار نیتروس اکسید را در خاک‌ورزی مرسوم گزارش کرده‌اند (Koga, 2013; Mutegi *et al.*, 2010; Plaza-Bonilla *et al.*, 2014; Wang & Dalal, 2015).

۳-۵. هزینه اجتماعی (N₂O)

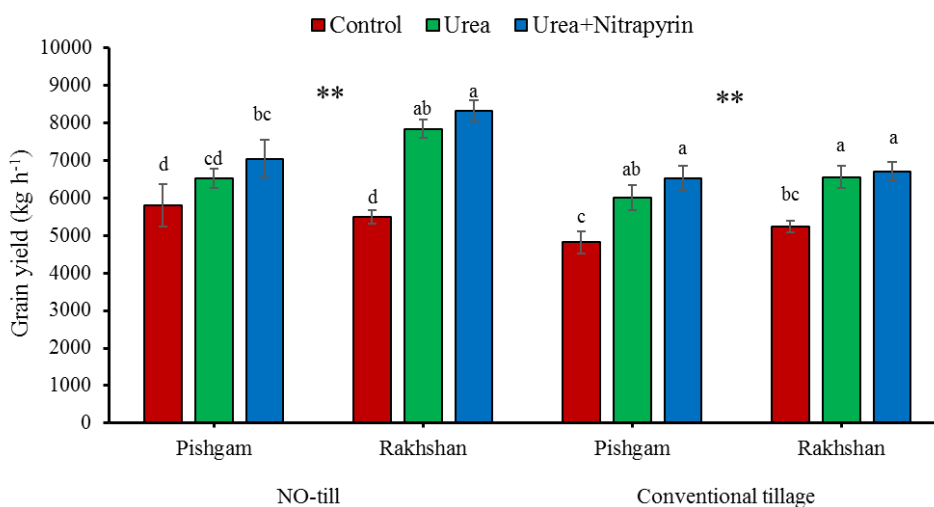
برآورد هزینه اجتماعی تولید نیتروس اکسید در سطوح کودی و سامانه خاک‌ورزی متفاوت بود، به‌طوری‌که باتوجه‌به میزان انتشار نیتروس اکسید تجمعی در کل دوره رشد گندم و حاصل ضرب آن در هزینه اجتماعی به‌ازای هر کیلوگرم نیتروس اکسید انتشاریافته در محیط زیست (۴/۵۸ دلار)، بالاترین هزینه اجتماعی با ۷/۹۱ دلار در ازای انتشار ۱/۷۲ kg N₂O-N ha⁻¹ در تیمار کودی کاربرد اوره و سامانه بدون خاک‌ورزی به‌دست آمد (شکل ۵). کاربرد نیتراپایرین منجر به کاهش ۳۱/۷۶ درصدی

هزینه اجتماعی شد، به طوری که به ازای تولید $1/17 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ $5/39$ دلار هزینه اجتماعی داشت (شکل ۵). در سامانه خاک‌ورزی مرسوم نیز کاربرد نیتراپایرین کاهش $18/91$ درصدی هزینه اجتماعی را به همراه داشت، به طوری که هزینه اجتماعی را از $6/40$ دلار در تیمار اوره به $5/19$ دلار در تیمار نیتراپایرین+اوره کاهش داد، این میزان به ترتیب به ازای تولید $1/13$ و $1/39 \text{ kg N}_2\text{O-N ha}^{-1}$ در طول دوره رشد گندم بود (شکل ۵). کمترین هزینه اجتماعی در تیمار کنترل و در هر دو سطح خاک‌ورزی مشاهده شد، با این حال به طور کلی میزان هزینه اجتماعی در بدون خاک‌ورزی در تمامی تیمارها نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود (شکل ۵). نتایج نشان داد میزان هزینه اجتماعی در تیمار کنترل، اوره و اوره+نیتراپایرین در سطح خاک‌ورزی مرسوم نسبت به بدون خاک‌ورزی به ترتیب $34/57$ ، $19/08$ و $3/83$ درصد کمتر بود، که علت آن میزان بالاتر انتشار نیتروس اکسید در سامانه بدون خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم می‌باشد. بررسی میزان انتشار نیتروس اکسید در بازه زمانی ۷ساله نشان داد میانگین انتشار نیتروس اکسید و همچنین دی اکسید کربن در سامانه بدون خاک‌ورزی به طور قابل توجهی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بالاتر بود که علت آن می‌تواند به دلیل حفظ بقایا و افزایش میزان کربن و نیتروژن کل خاک و زیست توده میکروبی در لایه‌های بالایی خاک باشد که هم‌زمان با افزایش میزان محتوای آب منافذ خاک میزان انتشار نیتروس اکسید نیز افزایش یافت (Lognoul et al., 2017). مطالعه دیگری نیز نشان داد بالاترین میزان انتشار نیتروس اکسید در شرایط بدون خاک‌ورزی و بالاترین میزان کاربرد نیتروژن در کشت ذرت به دست آمد که در این سامانه محتوای آب منافذ خاک بالای 60 درصد بود در حالی که در خاک‌ورزی مرسوم با محتوای آب منافذ خاک کمتر 40 درصد کمترین میزان انتشار نیتروس اکسید نیز مشاهده شد (Pareja-Sánchez et al., 2020). باتوجه به این مطالب می‌توان میزان هزینه اجتماعی بالاتر در سامانه بدون خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم را به دلیل بالاتر بودن نیتروس اکسید آن دانست. Kanter et al. (2021) گزارش دادند که اثرات نیتروس اکسید بر محیط زیست و سلامت و نقش آن در تخریب لایه ازن در برآوردهای هزینه اجتماعی به خوبی برآورد نشده است که این امر هزینه اجتماعی تولید و انتشار نیتروس اکسید را کاهش داده است، در صورتی که اگر خسارت آن بر لایه ازن را نیز وارد کنیم، میزان هزینه اجتماعی آن حدود 20 درصد بیشتر نیز خواهد شد. استفاده روز افزون از کودهای شیمیایی در حال افزایش است تا بتواند تقاضای مواد غذایی جهان را برآورده سازد، این استفاده بی‌رویه از کود نه تنها پایداری اکوسیستم را به خطر انداخته است، بلکه اثرات جانبی منفی به شکل هزینه‌های اجتماعی پنهان برای جامعه ایجاد می‌کند (ul Haq et al., 2020).

۳-۶. عملکرد دانه

بالاترین عملکرد دانه ارقام گندم در سطح کم خاک‌ورزی با 283 ± 8331 کیلوگرم در هکتار در رقم رخشان و سطح کودی اوره+نیتراپایرین به دست آمد، هرچند نسبت به سطح کودی اوره تفاوت معنی‌داری را نشان نداد (شکل ۶). تیمار کودی اوره+نیتراپایرین و اوره به ترتیب منجر به افزایش $51/75$ و $42/92$ درصدی عملکرد دانه نسبت به تیمار عدم کوددهی (شاهد) شد (شکل ۶). رقم پیشگام نیز رفتار مشابهی نسبت به تیمارهای اعمال شده از خود نشان داد (شکل ۶). در شرایط خاک‌ورزی مرسوم عملکرد رقم رخشان در سطح کودی اوره+نیتراپایرین (245 ± 6714 کیلوگرم در هکتار) نسبت به دیگر سطوح کودی بالاتر بود، با این حال تفاوت معنی‌داری با رقم پیشگام در سطح کودی اوره و اوره+نیتراپایرین نداشت (شکل ۶). افزایش عملکرد دانه نسبت به شاهد در رقم رخشان در سطح کودی اوره $24/9$ درصد و در سطح کودی اوره+نیتراپایرین $27/8$ درصد بود، این نسبت در رقم پیشگام به ترتیب $24/5$ و $35/2$ درصد بود (شکل ۶).

مقایسه عملکرد دانه گندم در دو سطح خاک‌ورزی نشان می‌دهد عملکرد دانه گندم در کم خاک‌ورزی بالاتر می‌باشد، به طوری که رقم رخشان در تیمار اوره+نیتراپایرین و شرایط کم خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم 24 درصد عملکرد بالاتری داشت، این نسبت در کود اوره نیز $19/5$ درصد بود (شکل ۶). باتوجه به نقش نیتراپایرین بر میزان نیتروفیکاسیون، به نظر می‌رسد فراهمی نیتروژن در محیط ریشه با بهبود خصوصیات فیزیولوژیک مؤثر بر عملکرد دانه، باعث افزایش عملکرد ارقام گندم در هر دو سطح خاک‌ورزی شده است. با این حال سطح کم خاک‌ورزی باتوجه به میزان ماده آلی بالاتر و خصوصیات کیفی بهتر نسبت به خاک‌ورزی مرسوم، عملکرد بالاتری را به دست آورد. عملکرد دانه ارقام گندم به دلیل خصوصیات متفاوت ژنتیکی می‌تواند متفاوت باشد، در این تحقیق نیز میان ارقام رخشان و پیشگام تفاوت‌ها معنی‌دار بود. بررسی‌ها نشان می‌دهد ترکیب تیمار اوره با نیتراپایرین می‌تواند منجر



شکل ۶. برهمکنش تیمارهای خاک‌ورزی × کود × رقم بر عملکرد دانه گندم. تفاوت‌های معنی‌دار ($P < 0.05$) بین تیمارها با حرف متفاوت نشان داده شده است. خطای استاندارد مقادیر گرفته‌شده از سه تکرار ($n=3$) می‌باشد.

به افزایش سطح برگ، جذب CO_2 و افزایش فتوسنتز در گیاه شود که این امر در نهایت با افزایش عملکرد گیاه همراه خواهد بود (Ren *et al.*, 2020). در این بررسی نیز به‌طور میانگین کاربرد نیتراپایرین منجر به افزایش ۴/۳۹ درصدی عملکرد دانه نسبت به اوره شد، هرچند این تفاوت معنی‌دار نمی‌باشد (شکل ۶). بهبود عملکرد گیاه در شرایط کاربرد نیتراپایرین می‌تواند به دلیل انرژی مصرفی کمتر در جذب آمونیوم نسبت به نیترات برای گیاه باشد (Dawar *et al.*, 2011; Zaman *et al.*, 2008). عملکرد دانه گندم در شرایط کاربرد نیتراپایرین+اوره نسبت به اوره خالص ۲۳ درصد و جذب کل نیتروژن تا ۳۰ درصد افزایش یافت (Dawar *et al.*, 2021). نیتراپایرین با بهبود سامانه آنتی‌اکسیدانی برگ و عملکرد فتوسنتز در گیاه ذرت باعث افزایش عملکرد گیاه شد (Ren *et al.*, 2020).

در این زمینه مطالعاتی نقش نیتراپایرین را مثبت و برخی مطالعات نیز کاربرد آن را بدون اثر منفی و یا مثبت بر عملکرد دانه گندم گزارش کردند (Corrochano-Monsalve *et al.*, 2020; Huérfano *et al.*, 2015, 2016). در این مطالعه به‌طور میانگین عملکرد دانه گندم در شرایط کم‌خاک‌ورزی نسبت به خاک‌ورزی مرسوم رشد ۱۴/۴۰ درصدی داشت و از ۵۹۲/۸۳ کیلوگرم در هکتار به ۶۸۴۴/۶۶ کیلوگرم در هکتار رسید. دیگر مطالعه نیز نشان داد در شرایط کاهش خاک‌ورزی عملکرد دانه گندم و زیست‌توده کل ۱۸ و ۱۵ درصد در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم افزایش یافت (Hofmeijer *et al.*, 2019). همچنین در شرایط بدون خاک‌ورزی در کشت گندم درصد کربن آلی خاک ۸/۲ درصد بالاتر بود که این امر می‌تواند در افزایش عملکرد دانه گندم اثرگذار باشد (Nadeem *et al.*, 2019).

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد کاربرد اوره نسبت به شرایط کنترل باعث افزایش میزان انتشار نیتروس‌اکسید در هردو سامانه خاک‌ورزی و مراحل نمو گندم شد. همچنین کاربرد نیتراپایرین در ترکیب با اوره منجر به کاهش انتشار نیتروس‌اکسید در سامانه‌های خاک‌ورزی شد. روند اثرگذاری نیتراپایرین با طی شدن مراحل نمو گندم کاهش یافت که رابطه مستقیم با نیمه‌عمر فعالیت آن دارد، به‌طوری‌که بالاترین میزان اثرگذاری هم‌زمان با اعمال تیمار نیتراپایرین و تقسیط کود اوره بود و کمترین آن در اواخر دوره رشد مشاهده شد. عملکرد گندم در شرایط کاربرد نیتراپایرین افزایش یافت، هرچند این برتری معنی‌دار نبود، با این حال افزایش درآمد اقتصادی کشاورزان در کنار کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌تواند مسیر تولید پایدارتری نسبت به شرایط کاربرد اوره باشد. شرایط بدون خاک‌ورزی نیز از نظر عملکرد دانه بهتر از شرایط خاک‌ورزی مرسوم بود. شرایط بدون خاک‌ورزی می‌تواند در صرفه‌جویی اقتصادی

و حفظ محیط زیست نیز مؤثرتر باشد، چرا که نسبت به خاک‌ورزی مرسوم می‌تواند ذخیره کربن آلی و رطوبت بالاتری داشته باشد. کاهش مصرف نیتروژن در کشاورزی با جایگزینی آن با کودهای زیستی و همچنین تثبیت‌کننده‌های نیتروژن در کنار کاربرد نیتراپایرین می‌تواند از راهکارهای اساسی در جهت کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای باشد.

۵. منابع

- Barrena, I., Menéndez, S., Correa-Galeote, D., Vega-Mas, I., Bedmar, E.J., González-Murua, C., & Estavillo, J.M. (2017). Soil water content modulates the effect of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) on nitrifying and denitrifying bacteria. *Geoderma*, 303, 1–8.
- Bayer, C., Gomes, J., Zanatta, J.A., Vieira, F.C.B., Piccolo, M., de, C., Dieckow, J., & Six, J. (2015). Soil nitrous oxide emissions as affected by long-term tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 146(PB), 213–222.
- Bhandari, M., Ma, Y., Men, M., Wu, M., Xue, C., Wang, Y., Li, Y., & Peng, Z. (2020). Response of winter wheat yield and soil N₂O emission to nitrogen fertilizer reduction and nitrapyrin application in North China plain. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 51(4), 554–565.
- Bhatia, A., Sasmal, S., Jain, N., Pathak, H., Kumar, R., & Singh, A. (2010). Mitigating nitrous oxide emission from soil under conventional and no-tillage in wheat using nitrification inhibitors. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 136(3–4), 247–253.
- Borzouei, A., Mander, U., Teemusk, A., Sanz-Cobena, A., Zaman, M., Kim, D.G., Muller, C., Kelestanie, A.A., Amin, P.S., Moghiseh, E., Dawar, K., & Pérez-Castillo, A.G. (2021). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and tillage practices on yield-scaled nitrous oxide emission from a maize field in Iran. *Pedosphere*, 31(2), 314–322.
- Cai, W., Ai, T., Li, R., Jin, Z., ... J.X.S., & F., & 2018, U. (2018). Effects of controlled release fertilizer and urea additive on photosynthetic characteristics and yield of double cropping rice. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 3, 54–60.
- Carbonetto, B., Rascovan, N., Álvarez, R., Mentaberry, A., & Vázquez, M.P. (2014). Structure, composition and metagenomic profile of soil microbiomes associated to agricultural land use and tillage systems in Argentine Pampas. *PLOS ONE*, 9(6), e99949.
- Chen, D., Freney, J., Mosier, A., & Chalk, P. (1994). Reducing denitrification loss with nitrification inhibitors following presowing applications of urea to a cottonfield. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 34 (1), 75.
- Corrochano-Monsalve, M., González-Murua, C., Estavillo, J.M., Estonba, A., & Zorraoindia, I. (2020). Unraveling DMPSA nitrification inhibitor impact on soil bacterial consortia under different tillage systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 301, 107029.
- Corrochano-Monsalve, M., Huérfano, X., Menéndez, S., Torralbo, F., Fuertes-Mendizábal, T., Estavillo, J.M., & González-Murua, C. (2020). Relationship between tillage management and DMPSA nitrification inhibitor efficiency. *Science of the Total Environment*, 718, 134748.
- Cui, P., Fan, F., Yin, C., Li, Z., Song, A., Wan, Y., & Liang, Y. (2013). Urea- and nitrapyrin-affected N₂O emission is coupled mainly with ammonia oxidizing bacteria growth in microcosms of three typical Chinese arable soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 66, 214–221.
- Dawar, K., Khan, A., Sardar, K., Fahad, S., Saud, S., Datta, R., & Danish, S. (2021). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and mulch on N₂O emission and fertilizer use efficiency using 15N tracing techniques. *Science of the Total Environment*, 757, 143739.
- Dawar, K., Sardar, K., Zaman, M., Müller, C., Sanz-Cobena, A., Khan, A., Borzouei, A., & Pérez-Castillo, A.G. (2021). Effects of the nitrification inhibitor nitrapyrin and the plant growth regulator gibberellic acid on yield-scale nitrous oxide emission in maize fields under hot climatic conditions. *Pedosphere*, 31(2), 323–331.
- Dawar, K., Zaman, M., Rowarth, J.S., Blennerhassett, J., & Turnbull, M.H. (2011). Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation. *Biology and Fertility of Soils*, 47(2), 139–146.
- Duan, Y.F., Kong, X.W., Schramm, A., Labouriau, R., Eriksen, J., & Petersen, S.O. (2017). Microbial N transformations and N₂O emission after simulated grassland cultivation: Effects of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP). *Applied and Environmental Microbiology*, 83(1).
- Grave, R.A., Nicoloso, R.da.S., Cassol, P.C., da Silva, M.L.B., Mezzari, M.P., Aita, C., & Wudén, C.R. (2018). Determining the effects of tillage and nitrogen sources on soil N₂O emission. *Soil and Tillage Research*, 175, 1–12.
- Hofmeijer, M., Krauss, M., Berner, A., Peigné, J., Mäder, P., & Armengot, L. (2019). Effects of reduced tillage on weed pressure, nitrogen availability and winter wheat yields under organic management. *Agronomy*, 9(4), 180.
- Huérfano, X., Fuertes-Mendizábal, T., Duñabeitia, M.K., González-Murua, C., Estavillo, J.M., & Menéndez, S. (2015). Splitting the application of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP): Influence on greenhouse gases emissions and wheat yield and quality under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 64, 47–57.
- Huérfano, X., Fuertes-Mendizábal, T., Fernández-Diez, K., Estavillo, J.M., González-Murua, C., & Menéndez, S. (2016). The new nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole succinic (DMPSA) as an alternative to DMPP for reducing N₂O emissions from wheat crops under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 80, 78–87.

- Jalilian, A., Mondani, F., Khorramivafa, M., & Bagheri, A. (2018). Evaluation of CliPest model in simulation of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) and wild oat (*Avena ludoviciana* L.) competition in Kermanshah. *Journal of Agroecology*, 10(1), 248–266. (In Farsi)
- Kanter, D.R., Wagner-Riddle, C., Groffman, P.M., Davidson, E.A., Galloway, J.N., Gourevitch, J.D., van Grinsven, H.J.M., Houlton, B.Z., Keeler, B.L., Ogle, S.M., Pearen, H., Rennert, K.J., Saifuddin, M., Sobota, D.J., & Wagner, G. (2021). Improving the social cost of nitrous oxide. *Nature Climate Change*, 11(12), 1008–1010.
- Keshavarz Afshar, R., Lin, R., Mohammed, Y.A., & Chen, C. (2018). Agronomic effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization and nitrogen utilization in a dryland farming system: Field and laboratory investigation. *Journal of Cleaner Production*, 172, 4130–4139.
- Khodabin, G., Lightburn, K., Hashemi, S.M., Moghadam, M.S.K., & Jalilian, A. (2022). Evaluation of nitrate leaching, fatty acids, physiological traits and yield of rapeseed (*Brassica napus*) in response to tillage, irrigation and fertilizer management. *Plant and Soil*, 2022, 1–18.
- Koga, N. (2013). Nitrous oxide emissions under a four-year crop rotation system in northern Japan: Impacts of reduced tillage, composted cattle manure application and increased plant residue input. *Soil Science and Plant Nutrition*, 59(1), 56–68.
- Li, J., Kwak, J.H., Chen, J., An, Z., Gong, X., & Chang, S.X. (2021). Canola straw biochars produced under different pyrolysis temperatures and nitrapyrin independently affected cropland soil nitrous oxide emissions. *Biology and Fertility of Soils*, 57(2), 319–328.
- Linn, D.M., & Doran, J.W. (1984). Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. *Soil Science Society of America Journal*, 48(6), 1267–1272.
- Liu, Y.N., Li, Y.C., Peng, Z.P., Wang, Y.Q., Ma, S.Y., Guo, L.P., Lin, E.D., & Han, X. (2015). Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N₂O emissions from wheat fields in North China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(6), 1184–1191.
- Lognoul, M., Theodorakopoulos, N., Hiel, M.P., Regaert, D., Broux, F., Heinesch, B., Bodson, B., Vandebol, M., & Aubinet, M. (2017). Impact of tillage on greenhouse gas emissions by an agricultural crop and dynamics of N₂O fluxes: Insights from automated closed chamber measurements. *Soil and Tillage Research*, 167, 80–89.
- Marquina, S., Pérez, T., Donoso, L., Giuliani, A., Rasse, R., & Herrera, F. (2015). NO, N₂O and CO₂ soil emissions from Venezuelan corn fields under tillage and no-tillage agriculture. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 101(1), 123–137.
- Moghadam, M.S.K., Rad, A.H.S., Khodabin, G., Jalilian, A., & Bakhshandeh, E. (2022). Application of silicon for improving some physiological characteristics, seed yield, and oil quality of rapeseed genotypes under late-season drought stress. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 2022, 1–19.
- Mutegi, J.K., Munkholm, L.J., Petersen, B.M., Hansen, E.M., & Petersen, S.O. (2010). Nitrous oxide emissions and controls as influenced by tillage and crop residue management strategy. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(10), 1701–1711.
- Nabavi-Pelesaraei, A., Rafiee, S., Mohtasebi, S.S., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., & Chau, K.W. (2019). Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 217, 742–756.
- Nadeem, F., Farooq, M., Nawaz, A., & Ahmad, R. (2019). Boron improves productivity and profitability of bread wheat under zero and plough tillage on alkaline calcareous soil. *Field Crops Research*, 239, 1–9.
- Nunes, M.R., Karlen, D.L., Veum, K.S., Moorman, T.B., & Cambardella, C.A. (2020). Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. *Geoderma*, 369, 114335.
- O'Callaghan, M., Gerard, E.M., Carter, P.E., Lardner, R., Sarathchandra, U., Burch, G., Ghani, A., & Bell, N. (2010). Effect of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) on microbial communities in a pasture soil amended with bovine urine. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(9), 1425–1436.
- Ouyang, Y., Norton, J.M., & Stark, J.M. (2017). Ammonium availability and temperature control contributions of ammonia oxidizing bacteria and archaea to nitrification in an agricultural soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 113, 161–172.
- Pareja-Sánchez, E., Cantero-Martínez, C., Álvaro-Fuentes, J., & Plaza-Bonilla, D. (2020). Impact of tillage and N fertilization rate on soil N₂O emissions in irrigated maize in a Mediterranean agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 287, 106687.
- Plaza-Bonilla, D., Álvaro-Fuentes, J., Arrúe, J.L., & Cantero-Martínez, C. (2014). Tillage and nitrogen fertilization effects on nitrous oxide yield-scaled emissions in a rainfed Mediterranean area. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 189, 43–52.
- Pokharel, P., & Chang, S.X. (2021). Biochar decreases the efficacy of the nitrification inhibitor nitrapyrin in mitigating nitrous oxide emissions at different soil moisture levels. *Journal of Environmental Management*, 295, 113080.
- Ramotowski, D., & Shi, W. (2022). Nitrapyrin-based nitrification inhibitors shaped the soil microbial community via controls on soil pH and inorganic N composition. *Applied Soil Ecology*, 170, 104295.
- Ren, B., Hu, J., Zhang, J., Dong, S., Liu, P., & Zhao, B. (2020). Effects of urea mixed with nitrapyrin on leaf photosynthetic and senescence characteristics of summer maize (*Zea mays* L.) waterlogged in the field. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(6), 1586–1595.
- Souza, R.C., Cantão, M.E., Vasconcelos, A.T.R., Nogueira, M.A., & Hungria, M. (2013). Soil metagenomics reveals

- differences under conventional and no-tillage with crop rotation or succession. *Applied Soil Ecology*, 72, 49–61.
- Thompson, K.A., Bent, E., Abalos, D., Wagner-Riddle, C., & Dunfield, K.E. (2016). Soil microbial communities as potential regulators of in situ N₂O fluxes in annual and perennial cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 103, 262–273.
- ul Haq, S., Boz, I., Shahbaz, P., & Yildirim, Ç. (2020). Evaluating eco-efficiency and optimal levels of fertilizer use based on the social cost and social benefits in tea production. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(26), 33008–33019.
- Wang, W., & Dalal, R.C. (2015). Nitrogen management is the key for low-emission wheat production in Australia: A life cycle perspective. *European Journal of Agronomy*, 66, 74–82.
- Wolt, J.D. (2000). Nitrapyrin behavior in soils and environmental considerations. *Journal of Environmental Quality*, 29(2), 367–379.
- Woodward, E.E., Edwards, T.M., Givens, C.E., Kolpin, D.W., & Hladik, M.L. (2021). Widespread use of the nitrification inhibitor nitrapyrin: Assessing benefits and costs to agriculture, ecosystems, and environmental health. *Environmental Science & Technology*, 55(3), 1345–1353.
- Xia, X., Zhang, P., He, L., Gao, X., Li, W., Zhou, Y., Li, Z., Li, H., & Yang, L. (2019). Effects of tillage managements and maize straw returning on soil microbiome using 16S rDNA sequencing. *Journal of Integrative Plant Biology*, 61(6), 765–777.
- Zaman, M., Nguyen, M.L., Blennerhassett, J.D., & Quin, B.F. (2008). Reducing NH₃, N₂O and NO₃ –N losses from a pasture soil with urease or nitrification inhibitors and elemental S-amended nitrogenous fertilizers. *Biology and Fertility of Soils*, 44(5), 693–705.
- Zhou, M., Zhu, B., Butterbach-Bahl, K., Wang, X., & Zheng, X. (2014). Nitrous oxide emissions during the non-rice growing seasons of two subtropical rice-based rotation systems in southwest China. *Plant and Soil*, 383(1–2), 401–414.